

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

再生サイクルガスタービン用流路スプリッタ付きデュアルスワールバーナを用いた燃焼器のNO_x排出特性に関する研究

著者	岩崎 智行
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	60
ページ	1-8
発行年	2019-03-31
URL	http://doi.org/10.15002/00021963

再生サイクルガスタービン用流路スプリッタ付き デュアルスワールバーナを用いた燃焼器の NO_x 排出特性に関する研究

A STUDY OF NO_x EMISSIONS CHARACTERISTICS FOR A DUAL SWIRL BURNER
WITH A FLOW PATH SPLITTER NOZZLE FOR REGENERATIVE GAS TURBINE COMBUSTORS.

岩崎 智行

Tomoyuki IWASAKI

指導教員 林茂

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

A unique non-staged burner consisting of a converging splitter nozzle, a converging outer shroud, and inner and outer swirlers is being developed for low NO_x emissions. Kerosene was atomized by the annular liquid film twin-fluid nozzle into the air flow from the inner swirler and resulting mixture was injected into combustion chamber from the splitter nozzle which is surrounded by the annular swirling air jet from the outer shroud nozzle. Emissions measurements and imaging of flame and fuel sprays were conducted. The effects of inlet air temperature, fuel temperature and injection positions on NO_x levels are discussed based on the changes of flame structure and fuel evaporation with the burner design and experimental parameters. The NO_x levels are well correlated with them. Emission Index for NO_x well less than 0.5 g/kg-fuel and combustion efficiency greater than 99.9% were simultaneously achieved at adiabatic flame temperatures lower than 1800 K at atmospheric pressure.

Key Words : *Liquid fuel, Low-NO_x emissions, Dual swirl burner, Flow path*

Splitter, non-staged fuel injection combustion

1. はじめに

近年、大規模・集中型エネルギー社会の脆弱性が問題視されており、地域分散型エネルギー社会構築のニーズが高まっている。地域分散型エネルギー社会はエネルギー供給のリスク分散を図れる利点があり、分散型発電装置として災害時にもコージェネレーションで排熱利用が可能な小型ガスタービンが注目を集めている。しかし、ガスタービンの使用は大気汚染防止法によって大気汚染物質の排出規制が定められており、特に航空用ガスタービンの NO_x 排出は ICAO によって規制されている。その規制は年々厳しくなり発電用ガスタービン燃焼器にも今まで以上に NO_x 排出の低減が求められる。

発電用の大型ガスタービンの多くは天然ガスを使用している。そのため希薄予混合(LP)方式が広く使用されており、NO_x 浄化システムなしで 5ppm (15%O₂) 未満の低 NO_x 燃焼が可能である。液体燃料を用いる場合、希薄予蒸発予混合(LPP)方式は均質な混合気によるリーンな燃焼が可能であるが、ステージングの必要性から装置は複雑化される。

大出ら[1]は、同軸方向の内外に二つのスワールと、それらのスワールを通った空気をバーナ出口部まで分ける先細スプリッタ、先細アウターシュラウドでバーナを構成し、インジェクタは内側の旋回気流にのみ燃料を噴射

する圧力スワールアトマイザを用いた。そのバーナとインジェクタを用いてステージングを行わない希薄直接噴射(LDI)方式でも、希薄予混合(LP)方式や予混合予蒸発(LPP)方式と同程度の低 NO_x 燃焼が可能であると示した。ただし、この大出らが示した希薄直接噴射方式燃焼とは燃焼部の上流に意図的な予混合部および予蒸発部を設けないものを指している。このデュアルスワールバーナによる燃焼はバーナ出口から離れたところに浮き上がり火炎を形成し、入口空気温度とともに断熱火炎温度も上昇しているにもかかわらず、ある入口空気温度までは NO_x 排出量が低減するという排出特性を示す。これは、火炎が浮き上がることによりバーナ出口から火炎形成位置の間で燃料噴霧の蒸発および混合が促進されることで、高い入口空気温度でも NO_x 排出量を抑えられるためである。

非ステージングかつ比較的簡単な構造で、高い入口空気温度でも NO_x の発生を抑えることのできるこのデュアルスワールバーナは、再生サイクルを組む小型ガスタービンへの適用が考えられる。このデュアルスワールバーナを用いた小型ガスタービンは地域分散型発電機や EV 車のレンジエクステンダなどに用いられると考えられ、

今後の需要の増加が期待できる。これらの用途では、ガスタービンは定格運転をされ続けることが多く、それ以外の条件での運転は始動時などの極一時的なものに限られる。そのため定格条件での NOx 排出量が最も少なくなるようなバーナが望ましい。この方式のバーナのさらなる NOx 排出の低減と燃料噴射距離の変化が与える排出特性の影響を調査するため、環状液膜二流体微粒化ノズルの噴霧位置とスプリッタ形状が NOx 排出量と火炎形状に及ぼす影響を大気圧下において燃焼試験及び噴霧試験によって調査したので報告する。

2. 実験装置・方法

2.1 燃焼器

供試燃焼器概要を図1に示す。燃焼器は流れ方向を上向きにとり、バーナはフランジ面下側から装着されている。空気チャンバ内の空気は多孔板、バーナ空気口を経てバーナ内部に流入、スプリッタにより分割された後、燃焼器ライナ内へ供給される。座標系は右手系とし、バーナ出口端面から下流方向に向かって z 軸、右方向に向かって x 軸をとる。

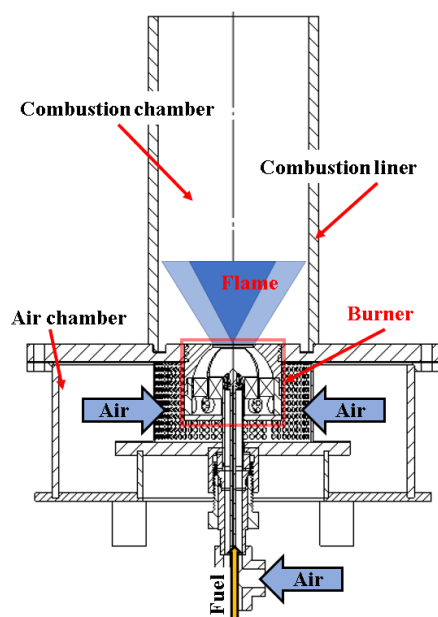


Fig.1 Schematic drawing of atmospheric test rig.

2.2 環状液膜二流体微粒化ノズル

図2のノズルは内外両流路にヘリカルな旋回羽が切られており、空気に旋回を与える。旋回羽は上流側から見てともに時計回り、ミッドスパン旋回角は 45° である。燃料は内側旋回羽内部にある燃料ポートを通じて、フィルマ内壁面まで供給され、内側旋回空気によって下流方向へ押し流されるとともに環状液膜化された後、外側・内側旋回空気により微粒化される。本ノズルは福添ら[2]のノズルを基本設計として踏襲している。

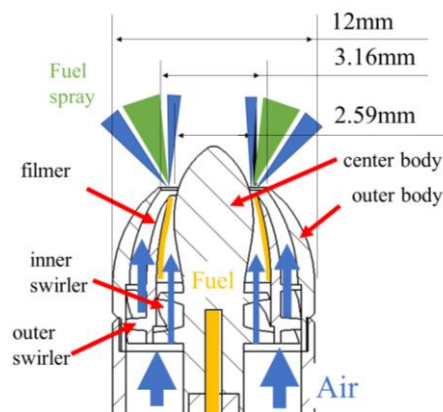


Fig.2 Schematic drawing of annular liquid film twin-fluid atomizer.

2.3 デュアルスワールバーナ

供試バーナを図3に示す。スプリッタのタイプは内外出口流路断面積をそれぞれ 1:1, 1:2 に内分する二種類のタイプを用いた (Type1:1 (内径 17mm), Type1:2 (内径 14mm))。これは大出,岩倉ら[1,3]によって圧カスワールノズルを用いた燃焼試験により排気分析および直接写真、噴霧 Mie 散乱撮影が行われており、バーナの詳細についてはそちらを参照されたい。議論の簡単化のため、以下にバーナ概要を示す。本バーナはスプリッタにより二分割された内外流路を空気が旋回羽を通して燃焼場に供給される仕組みになっている。中心に取り付けられたノズルからは霧化された燃料が内側流路内で空気と混合し、一部油滴はスプリッタに付着、環状液膜化され、出口リップ部で改めて微粒化される。ヘリカルに切られた旋回羽は内外それぞれミッドスパンにおいて、 40° , 45° である。

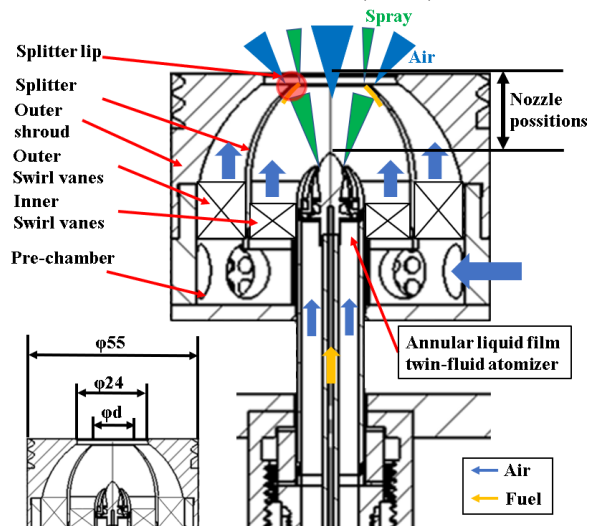


Fig.3 Schematic drawing of burner.

本実験ではバーナ端面からノズル先端位置までの距離を調節し、スプリッタと噴霧の干渉度合い及び内外流路断面積比が排出特性に及ぼす影響を調査した。スプリッタを Type1:1 と 1:2 の二種類、ノズル位置を浅い場合 (shallow position : sp), 中間の場合 (middle position :

mp), 深い場合 (deep position : dp) の三種類に分類し, 計 6 種類の形状で試験を行った. それぞれの組み合わせは以下の通りである.

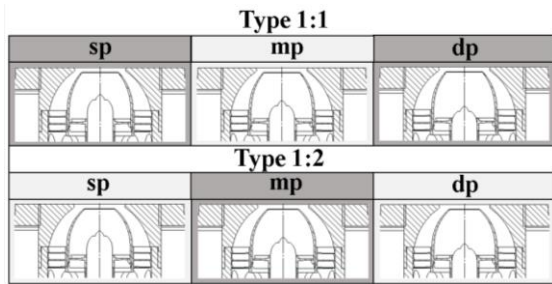


Fig.4 Schematic drawings of burner setups for experiments.

2.4 試験方法

燃焼実験は燃料に灯油を使用し, 大気圧下で行った. 圧損を 3% に固定し, バーナ入口空気温度 ($T_{in_a, b}$) を電気ヒーターで 453K から 853K まで 100K 刻みに設定した. また, 燃料温度は 313, 343, 373K のそれぞれに設定した (Table1). 燃焼器ライナには長さ 200mm の円筒を用い, 排気分析にはステンレス管 (内径 90.2mm) を, 火炎撮影には石英ガラス管 (内径 89mm) を使用した. 排気分析には HORIBA PG-340 を使用し, CO, CO₂, NO_x, O₂ の濃度を測定した. 排気ガスのサンプリングには, 二種のガスサンプリングプローブを用い, 各腕に 0.7mm の排気ガス採取孔 4 個を持つ, *字形の集合ガスサンプリングプローブおよび ϕ 2mm の排気ガス採取孔 1 個を持つ, 直径 10mm の単孔ガスサンプリングプローブを使用し, これをライナ出口面に設置して測定を行った. プローブ内部における化学反応を凍結させるため, プローブは水冷されている. ただし, 単孔ガスサンプリングプローブでは $z = 45$ mm のライナ断面を 7mm のメッシュで区切り測定を行った.

火炎撮影はカメラと反対側に黒色に塗装した鉄板を背景として設置し, Nikon D5300 を用いて, ライナの軸に垂直な方向から撮影を行った. 噴霧 Mie 散乱撮影時はカメラの撮影方向に対して垂直な位置から赤色 ($\lambda = 640$ nm) のレーザをシート状に照射し, 同じ位置から撮影を行った (①). バーナ出口からの噴霧を観察するため, 先のレーザシートが燃焼器中心軸を通るように照射し, ハイスピードカメラ (Photron FASTCAM Mini AX100 Type 540K-C-32GB) を用いて水噴霧 Mie 散乱を撮影した. 水噴霧試験ではスプリッタリップ部から噴霧の細部を観察するため, fps36000 に設定し視野を限定したもの (②) と, 噴霧場全体の観察のため fps10000 に設定したもの (③) がある, ③は微小液滴の挙動の観察のため斜めにカメラを設置し撮影した後, 画像処理により正面向きに補正している. ただし, ②試験においては, レーザおよびハイスピードカメラはバーナ端面に対してそれぞれ 26.6°, 25.0° 傾けている. 以下, ①, ②, ③の光学装置の配置を図 5 に示す.

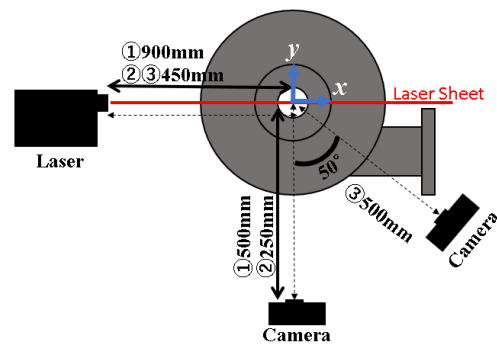


Fig.5 Optical setup.

Table1 Combustion test conditions.

Burner Type	1:1, 1:2
Injection position	Z = -8.5mm(sp) -11.5mm(mp) -14.5mm(dp)
Fuel	Kerosene
Combustion pressure loss	3%
Equivalence ratio Φ	0.4-0.5
Inlet air temp. $T_{in_a, b}$, K	453-853
Nozzle air flow rate $m_{n, g/s}$	1.28
Inlet nozzle air temp. $T_{in_a, n}$, K	420
fuel temp. T_{in_f} , K	313, 343, 373

次に, ノズル単体及びバーナの噴霧粒径計測試験装置を図 6 に示す. $z = 60$ mm の位置にレーザビームを照射し, 噴霧中心軸から $-y$ 方向に 0.75mm 間隔で粒径を計測した. 計測装置は LDSA-SPR1500A (Microtrac Inc.) を使用した. 本計測装置はビームが通過した全ての液滴を対象とした粒径を計測する装置であることに注意されたい. 本試験には水を使用した.

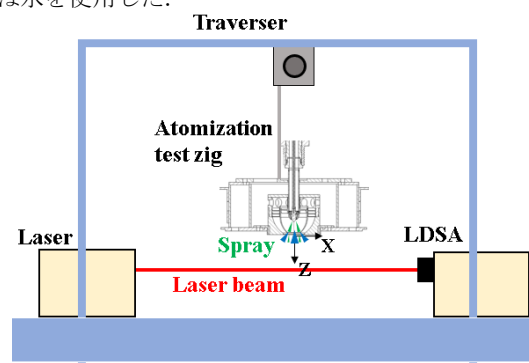


Fig. 6 Schematic drawing of atomization test rig.

3. 結果

3.1 バーナ形状および噴霧位置がNOx 排出特性に与える影響

$\phi 0.5$, 0.4 において $T_{in_a, b}$ が NOx 排出特性に及ぼす影響をそれぞれ図 7 に、同条件下において撮影された直接火炎およびそれに 波長 640nm のレーザシートを付加した直接火炎-噴霧 Mie 散乱画像をそれぞれ図 8, 9 に示す。

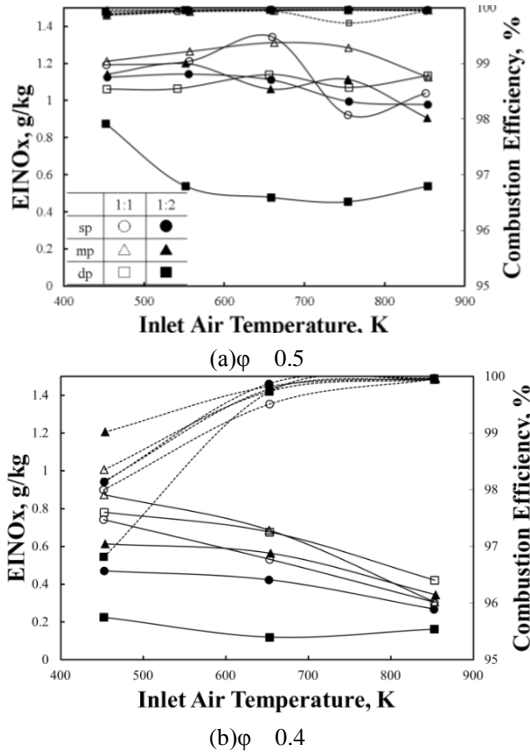


Fig.7 Effects of inlet air temperature on NOx emissions and combustion efficiency for different Types of burners.

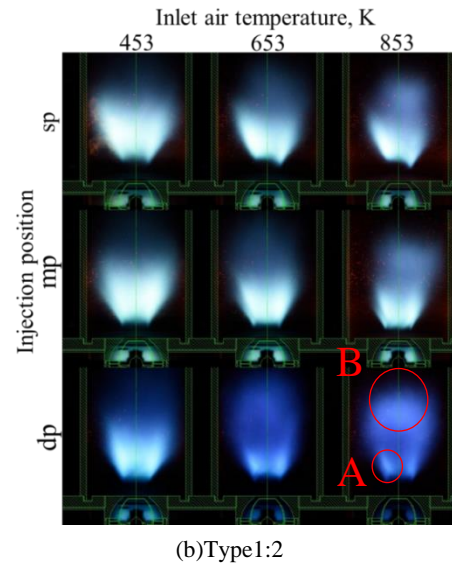
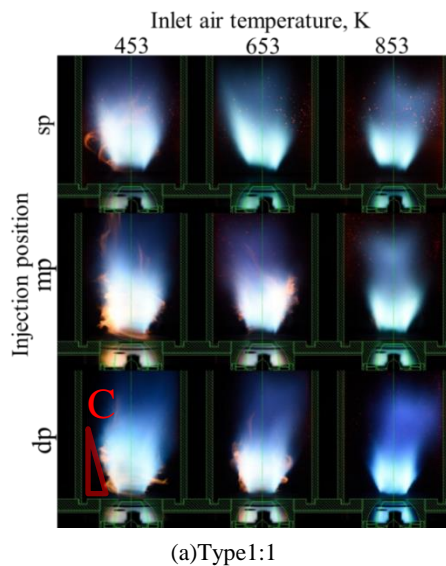


Fig.8 Direct photos of flames showing effects of injection positions, shutter speed 1/60sec, ISO800, f5.6

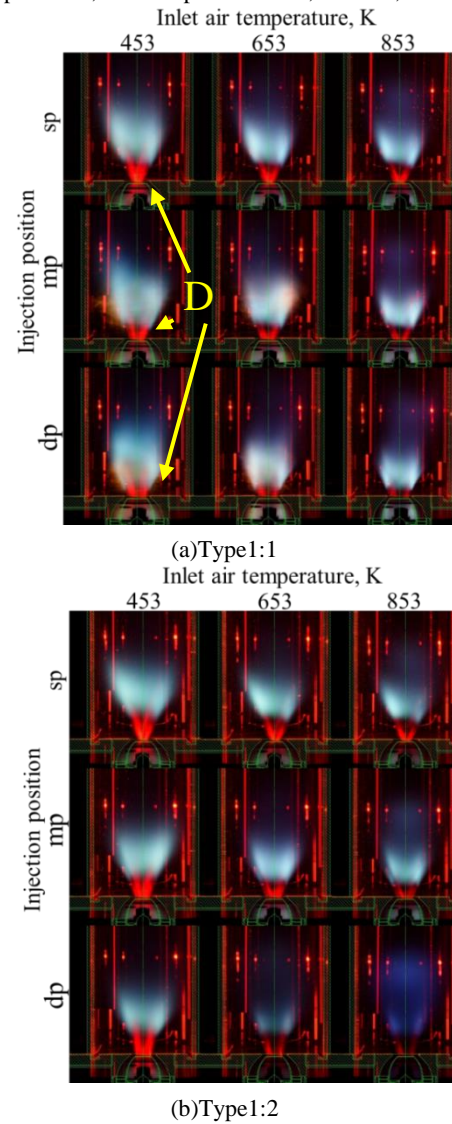
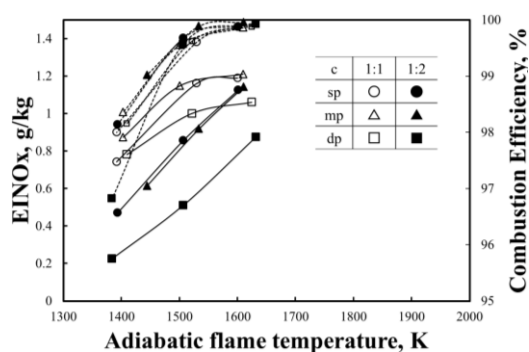


Fig.9 Photos of Mie scattered light of spray and flame, showing effects of injection positions, shutter speed 1/4sec, ISO100, f16.

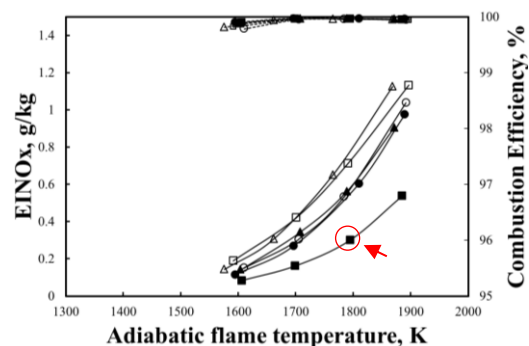
図 7 から分かるように、排出特性は 1:2_d が他と比較して優れており、他タイプ中では同タイプと比較した場合には大きな差は見られない。 Φ が 0.4 に下がると 1:2_d と他タイプとの差は縮まるが、453K 側では 1:2_s と比較しても排出特性には 2 倍程度の開きがある。図 9, 10 から明らかなように、1:2_d の火炎写真は他タイプと比較して輝度が低く、全体としてリーンな燃焼場が形成されていることは明らかである。dp タイプの場合において顕著ではあるが、全てに一貫して一致していることは $T_{in_a, b}$ の上昇に伴って火炎は図 8 中 A 部 (火炎 A), B 部 (火炎 B) のそれぞれに明確に分離し始め、火炎 B の輝度が増え、一方で火炎 A の輝度が減ることである。これは岩倉ら [3] によって既に報告されていたが、環状液膜二流体微粒化ノズルであっても同様な現象が観察された。また、図 8 中の燃焼器肩部 (C 部) では高輝度の低酸素状態の炎が観察された。これは 1:1 において、 $T_{in_b, a}$ の低い条件の全てにおいて、1:2 においては sp においてのみ確認された。

また 1:1 について、ノズル位置を上流方向へ移動させると火炎 A のリフトオフ距離が次第に短くなっていくことが確認できる (図中 D 部)。この傾向は 1:2 では見られない。

各 $T_{in_a, b}$ における断熱火炎温度 (T_{ad}) が NOx 排出特性に及ぼす影響を図 10 に示す。



(a) $T_{in_a, b}$ 453K



(b) $T_{in_a, b}$ 853K

Fig.10 Comparison of NOx emissions and combustion efficiencies.

図からわかるように、断熱火炎温度で比較をした場合、1:2 は 1:1 と比較して全体的に優位であることが確認される。(b) 図で丸く囲まれた測定点は Φ 0.45 の条件であるが、 $EINO_x$ 0.30, T_{ad} 1794K において 2.24ppm (15%) を達成している。

3.2 バーナ形状とノズル位置が噴霧形状および燃焼場に及ぼす影響

水噴霧粒径計測試験の結果を図 11 に示す。なお、トラバース方向は $-r$ であるが、便宜的に横軸は r とした。粒径はバーナを取り付けた場合には、中心軸付近では大きな差は見られず、噴霧外周部に近づくほど 1:1_dp の優位性が表れた。排気特性では 1:2_dp が最も優れていたが、噴霧粒径分布では他タイプに比較して劣る結果となった。

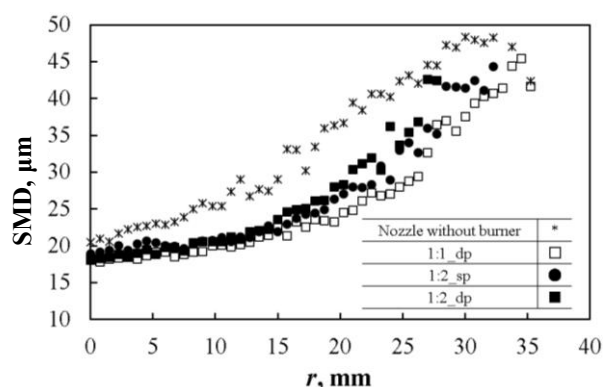


Fig.11 Atomization characteristics of annular twin-fluid atomizer and burners.

ハイスピードカメラによる水噴霧試験の時間平均画像と瞬間 Mie 散乱画像をそれぞれ図 12, 13 に示す。ここで、本噴霧試験では燃焼器ライナが外された状態で撮影されていることに注意されたい。図 12 は fps10000、露光時間 $20 \mu s$ で撮影された図 13 の瞬間写真の 300 枚相加平均画像である。

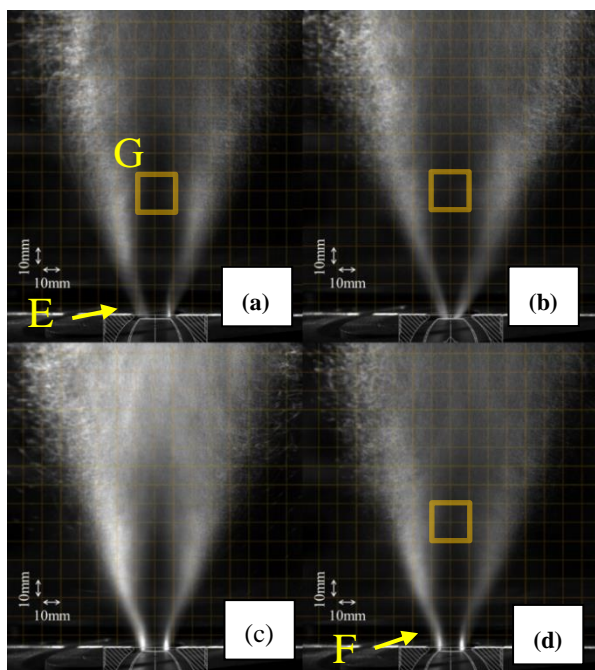
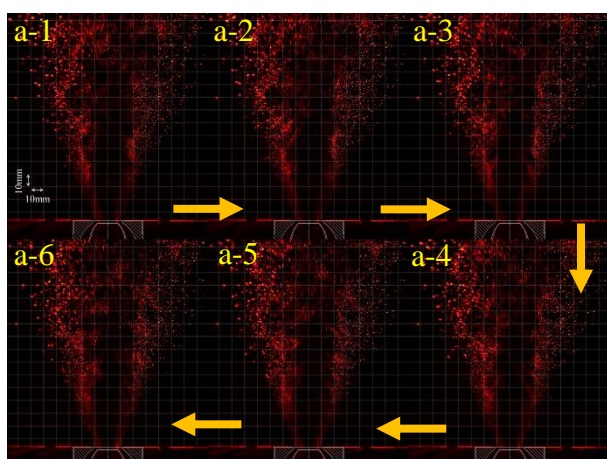
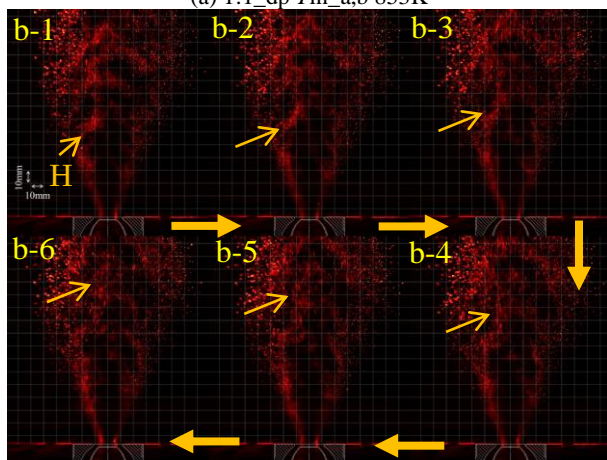


Fig.12 photos of time averaged Mie scatterd light of spray with a Type of burners,
(a) 1:1_dp Tin_a,b 853K, (b) 1:2_ds Tin_a,b 853K,
(c) 1:2_dp Tin_a,b 453K, (d) 1:2_dp Tin_a,b 853K.



(a) 1:1_dp Tin_a,b 853K



(b) 1:2_dp Tin_a,b 853K

Fig.13 photos of Mie scatterd light of spray by HSC, fps
10000, exposure time 20μs.

図 12(c), (d) の Mie 散乱画像の輝度値より, $T_{in_a, b}$ は噴霧の蒸発に強く影響する. また, (a) と (d) を比較すると, スプリッタリップ部直下流の噴霧形状が異なることがわかる (図中 E 部, F 部). (d) では流れ方向に平行に噴射されているが, (a) では同部直下から半径方向に広がっている. これは, スプリッタ出口部におけるスワール数によるものと考えられ, 本バーナにおいては 1.2 倍程度 1:1 の方が大きな値となる. ノズル先端位置が最も下流方向にある (b) では, ノズルから噴射された噴霧がほとんどスプリッタに衝突しておらず, この衝突の度合いは噴霧角やその分布に大きな影響を与えることがわかる. また, (a) (b) (d) の図中 A 部では, バーナタイプ, ノズル位置がバーナ軸中心回りの噴霧濃度場に大きな影響を与えることが示された.

保炎場の確認のため, 1:2_dp, $T_{in_a, b}$ 453K で K 熱電対をバーナ端面から 20mm, 先端をライナ軸中心へ 5mm 挿入した状態で簡易実験を行ったところ, 非燃焼状態では 435K, 燃焼状態では 1200K 以上の温度が確認されたため, 既燃ガスを燃焼器肩部再循環領域 (ORZ) に巻き込むことで火炎 A は保炎されていることがわかっていて.

図 13 において, (a-1) で主噴霧コーンから引きちぎられる様に枝分かれした比較的細かな液滴群 (H 部) が (a-6) に至る間, 下流方向に押し流されている. このことから, 本バーナにおいては一般的な旋回保炎バーナの持つ内部循環領域 (IRZ) は存在しない可能性が高く, また, E 部液滴群とバーナ内部およびリフトオフ部で蒸発した蒸気の下流部への逆流のない直接的な供給が火炎 B を形成していると考えられる. 火炎 B の保炎機構は弱旋回バーナ特有の燃焼速度と流速のつり合いによる保炎^[4]である可能性がある.

バーナ出口直下に視野を絞った Mie 散乱画像 (fps 36000, exposure time 24.66 μs) を図 14 に示す. (b) と (c) について, 燃料噴射位置が dp では sp に比較してスプリッタに衝突する液滴の量が多い. また, 噴霧位置 dp の (a) と (c) については, 開口の広い 1:1 では, ノズルから直接噴霧された一部の大きな粒径の液滴がスプリッタに衝突することなく半径方向に飛散していることがわかる (I 部). 一方でスプリッタの開口の狭い 1:2 では多く液滴が当たり, 同部リップから噴射される液滴の量と密度が高い (J 部) ことが確認されるとともに, 加熱空気により高温となったスプリッタからの熱伝導によりスプリッタリップ部直下流から蒸発が活発に起こっていることが確認される. また, (a) と比較すると大きな液滴の半径方向への飛散はスプリッタへの衝突と同部から噴出する弱旋回空気流によって抑制されている. 常温における噴霧外周部付近の粒径は, 1:1_dp, 1:2_sp が 1:2_dp と比較して優位であったのにも関わらず排気分析では逆の結果であったことから, 高温既燃ガスが存在する ORZ 付近への直接的な燃料液滴の投入は, 拡散火炎による局所的な高温

場の形成を活性化させるため、NO_x 排出量を増加させる主要因となっていると考えられる。

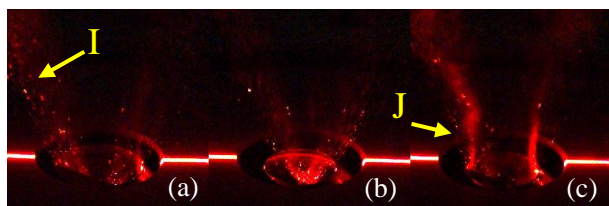


Fig.14 photos of Mie scattered light of spray by HSC, fps 36000, exposure time 24.66 μ s, (a) Type1:1_dp $T_{in_a,b}$ 853K, (b) Type1:2_ds $T_{in_a,b}$ 853K, (c) Type1:2_dp $T_{in_a,b}$ 853K.

以上より、1:1 と 1:2 では、同一のノズル位置であっても、スワール数の異なる流れ場や、空気流量分配比の違いから起こる半径方向への液滴の流れを阻害するシールド空気の厚み、ノズル噴霧のスプリッターへの干渉の度合いがことなることから、火炎Aと火炎Bのそれぞれに供給される油滴の量が異なることが予想され、実際に図 8, 9 からもその影響が受けてとれる。

単孔プローブによる $z = 45\text{mm}$ 位置でのガス分析結果を図 15 に示す。全てのタイプにおいて、O₂ および CO₂ 酸素濃度から、本バーナにおいて既燃ガスを巻き込む IRZ の存在はガス分析結果からも存在しないことが確認された。また、(a)と(c)の比較より、1:2_dp は他と比較して緩慢な燃焼が行われていることが排気分析の結果からも明らかである。これは図 8, 10 で見られる火炎 B への燃料の供給が他よりも多いことと、本バーナの低 NO_x 燃焼においてはスプリッターリップから噴霧された液滴をいかに下流まで燃焼させずに蒸発、混合させてしまうかが重要であることを示している。

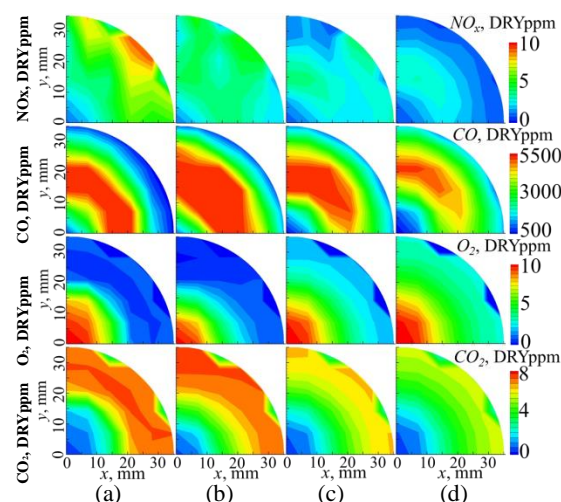


Fig.15 Molecule concentration distribution at $T_{in_a,b}$ 853K, (a)1:1_dp T_{in_f} 313K(b)1:2_sp T_{in_f} 313K(c)1:2_dp T_{in_f} 313K(d)1:2_dp T_{in_f} 373K.

3.3 燃料温度が NO_x 排出特性に及ぼす影響

$\Phi 0.5$, $T_{in_b,a}$ 653, 853K, T_{in_f} 328, 343, 373K におけるガス分析結果および直接-Mie 散乱画像をそれぞれ図 16, 17 に示す。なお、下図の排気分析において、燃焼効率 は全て 99.9%以上である。

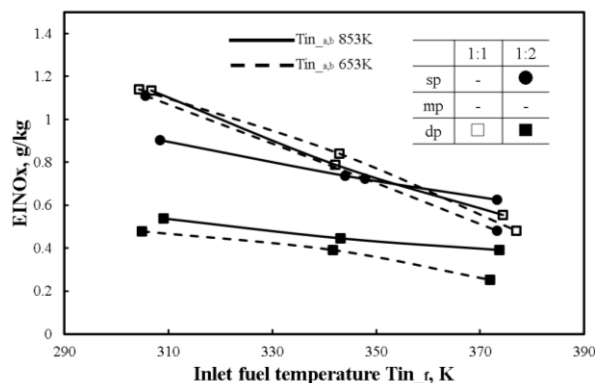
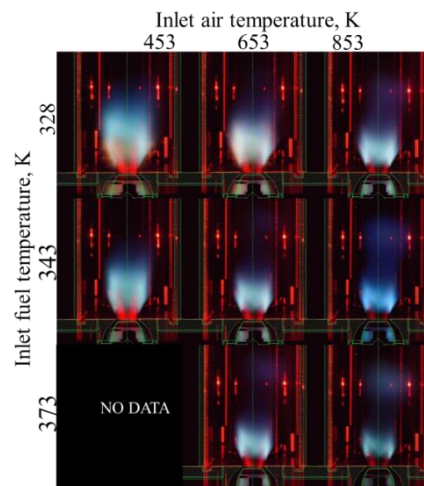
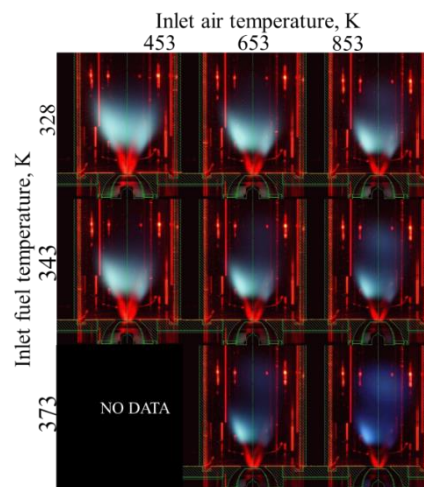


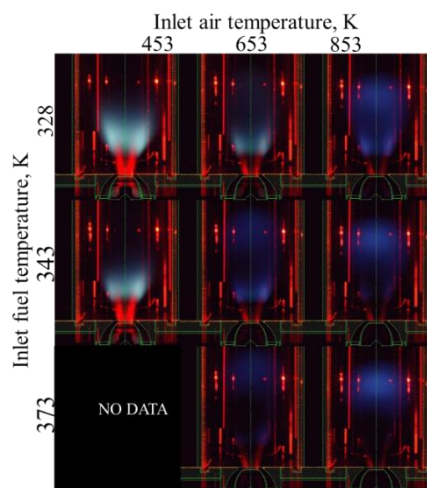
Fig.16 The effects of inlet fuel temperature on NO_x emissions.



(a)1:1_dp $T_{in_a,b}$ 853K



(b)1:2_sp $T_{in_a,b}$ 853K



(c) 1:2_dp $T_{in_a,b}$ 853K

Fig.17 Photos of Mie scattered light of spray and flame, showing effects of inlet fuel temperature, shutter speed 1/4sec, ISO100, f16.

図 17 より, T_{in_f} の上昇はどのバーナタイプにおいても火炎 A の輝度を低下させ, 火炎 B の輝度を増加させる作用があることがわかる. 上記からも予想されるように, 図 16 より燃料温度は各 $T_{in_a,b}$ において NOx 排出量を低減させる効果がある. [5]ではプレーンジェットタイプのエアブラストアトマイザを用いた実験により, 燃料の蒸発に T_{in_f} が強く影響することが報告されている. 本バーナにおいても, 燃料の蒸発が促進された結果, 下流への燃料蒸気および微小液滴群の燃焼器ライナ中心への誘引を促進させることがわかった. また, $T_{in_a,b}$ 653K では, 853K と比較して常に NOx 排出が小さい. 図 18 から明らかなように, 火炎 B の輝度値が 853K では常に高く, 653K では常に小さい. また, 火炎 A の輝度値はその逆の関係になっており, 火炎 A と火炎 B への燃料蒸気, 液滴の供給バランスが重要である可能性が示唆される.

4. 結論

環状液膜二流体微粒化ノズルを装着した再生サイクルガスタービン用流路スプリッタ付きデュアルスワールバーナを用いて, 内外流路断面積比と燃料噴射位置を変化させた燃焼及び噴霧試験を行い, 以下のことがわかった.

(a) 噴霧液滴径においては 1:1_dp に優位性がある一方で, 排出特性は 1:2_dp が優れている.

(b) バーナ直下に形成される円錐状の火炎とバーナ軸中心付近に形成される球状の火炎が存在し, 前者の保炎機構は燃焼器肩部に存在する高温外部再循環流である.

(c) 排出特性の優劣に決定的な影響を及ぼすのは, バーナ中心軸付近に微小液滴と燃料蒸気を供給し, 半径方向への急な油滴の飛散を抑制することである. バーナ内部流路の旋回が強い場合にはその抑制は困難である.

(d) (c)を達成するためには, 燃焼器内, 特にバーナ直下の流れ場を最適化する必要がある. これは空気内分比とバ

ーナ内外流路の旋回羽の旋回角変更による出口スワール数の調整によって達成される可能性がある.

(e) 燃料の加熱は排出特性の改善に対して簡易かつ有効なアプローチであり, 燃料の蒸発と混合を活性化させる効果がある.

謝辞

本研究を進めるにあたり昼夜問わず本当に親身にご指導頂きました林茂教授, 試験装置の加工や設計への助言を多く頂きましたワークショップの方々, 無理な要望に何度も答えてもらい本研究を支えてくれました後輩の鈴木晴樹君, 皆様へ心より御礼申し上げます.

参考文献

- [1] 大出駿作, 高岡麻衣, 岩倉正尚, 春日俊相, 林茂, 低 NOx ガスタービン燃焼器用液体燃料直接噴射方式バーナの排気特性, 第 57 回航空原動機・宇宙推進講演会 講演論文集, JSASS-2017-0092, 2017
- [2] 福添勇人, 林茂, 環状液膜二流体微粒化ノズルの微粒化性能に及ぼす液膜形成器の先端形状と旋回気流方向の組み合わせの影響 5, 第 24 回微粒化シンポジウム講演論文集, pp. 24-27, 201
- [3] 岩倉正尚, 岩崎智行, 黒崎孝介, 林茂, 液体燃料直接噴射デュアルスワールバーナの NOx 排出特性に及ぼす流路形状と空気配分比の影響, 第 46 回日本ガスタービン学会定期講演会(鹿児島)講演論文集, 2018 10
- [4] R. K. Cheng, D. T. yegian, M. M. Miyasato, G. S. Samuelsen, C. E. Benson, R. Pellizzari and P. Loftus, scaling and development of low-swirl burners for low emission furnaces and boilers, scaling and development of low-swirl burners for low emission furnaces and boilers, proceedings of the combustion institute, volume 28, 2000/pp. 1305-1313
- [5] C. Hassa, P.F. Wiesmath, The effect of initial fuel temperature on vaporization in aeroengine combustors with prevaporization, ICLASS 2012, 12th, Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Heidelberg, Germany, September 2-6, 2012